

Evaluation of Photon and Photoneutron Using High Energy X-ray in Radiation Therapy Room

Eun-Tae Park

Department of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University.

Received: August 12, 2016. Revised: October 19, 2016. Accepted: October 30, 2016

ABSTRACT

Recently increased use of high energy x-ray in radiation therapy, so therapeutic efficiency of tumors that located deep part also increased. However, photoneutron is problem which is generated caused by photoneuclear reaction. Photoneutron is continually required management because of that is more harmful than photon. In this regard, the study utilizing simulation of the Monte Carlo method is actively progress about photoneutron but measure is deficient. So this study was analyzed the correlation between the measured photon and photoneutron by radiation measurement device. As a result, photons were reduced when distance is farther and field size is smaller. But photoneutron were increased when field size is smaller and increased to a certain distance then reduced.

Keywords: Photoneuclear reaction, Photoneutron, Photon

I . INTRODUCTION

방사선 치료는 암을 치료하는데 있어 외과적인 수술 및 항암치료와 함께 3대 치료기법으로 중추적인 역할을 담당하고 있다.^[1] 또한 방사선 치료의 주를 이루는 선형가속기(Linear accelerator, LINAC)의 발달로 고 에너지의 사용이 증가하였으며, 이로 인해 심부에 위치한 종양의 치료효율을 높이고 있다.^[2] 하지만 고에너지의 광자는 주변 물질과 상호작용을 일으키며 광핵반응(Photoneuclear effect)으로 인한 광중성자(Photoneutron)를 발생시킨다.^[3-6] 이렇게 생성된 광중성자는 환자 및 시술자에게 2차적인 피폭을 야기 시키며, 광자에 비해 선 에너지부여(Linear energy transfer, LET) 및 생물학적 효과비(Relative biological effectiveness, RBE)가 상대적으로 높아, 적은 선량으로도 인체의 위해도가 높다.^[7,8]

국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에서는 중성자의 에너지에 따라 가중치를 다르게 설정하였으며, 이차적인 피폭

선량의 최적화에 관한 추가적인 논의가 필요하다고 언급하였다.^[9] 또한 방사선 방어 및 측정위원회(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)와 미국 의학물리학회(American Association of Physicist in Medicine, AAPM)에서도 의료용 X-선 장치 주변의 중성자 선량분포에 대한 연구와 중성자 측정에 대한 표준안을 제시하고 있다.^[10,11]

치료기술이 발달함에 따라 광중성자의 관리의 필요성이 높아지면서 선량평가 및 선량분포를 평가하기 위해 MCNPX, GEANT4, EGS4 등의 모의실험 프로그램을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

그러나 계측기를 이용한 실측연구는 상대적으로 미비한 실정이며, 모의실험을 위한 모델링에서 실제 임상 방사선 치료실과 선형가속기를 동일하게 구현한다는 것은 쉽지 않은 일이다.

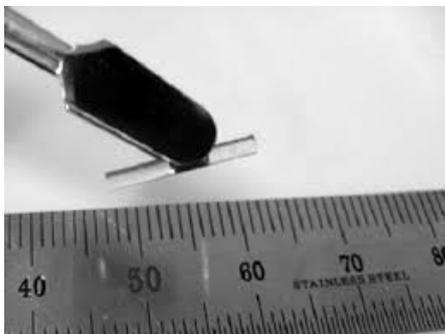
이에 본 연구는 치료실 내부에서 BF₃ 비례계수관 검출기로 중성자를 측정하고, 동일한 조건에서 유리선량계(Photoluminescence dosimeter)를 이용하여 광자를 측

정함으로써 전체적인 경향성과 상관관계를 알아보고자 한다. 또한 본 실험 결과와 선행된 몬테카를로 방식의 모의실험 결과를 비교, 평가함으로써 광중성자 측정의 기초자료를 제시하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 실험재료

본 연구의 고 에너지 X-선 조사를 위해 의료용 선형 가속기(Clinac iX-S, Varian Medical Systems, USA)의 15 MV 에너지를 사용하였다. 광자의 측정에는 Fig. 1의 (a)와 같이 유리선량계(GD-302M, Asahi Techno Glass, Japan)를 이용하였으며, Table 1에 본 실험에 사용된 유리선량계의 제원을 나타내었다. 광중성자의 측정에는 Fig. 1의 (b)와 같이 BF3 비례계수관 검출기(Victoreen 190N, Portable Neutron Survey Meter, Fluke, USA)를 이용하였으며, 검출기의 제원은 Table 2에 나타내었다. 계측기의 정확도와 신뢰성을 위해 원자력 안전법에 의거하여 한국표준과학연구원의 검교정 후 실험을 수행하였다.^[12]



(a) Photoluminescence dosimeter



(b) BF3 neutron survey meter

Fig. 1. Radiation measurement device.

Table 1. Specifications of photoluminescence dosimeter

Photoluminescence Dosimeter	
Dimensions	Ψ 1.5 × 12 mm
Display value unit	Gy (Sv)
Display value range	1 μ Gy (Sv) to 10 Gy (Sv)
Reproducibility	Coefficient of variation 5 % or less (at μ Gy) 2 % or less (at 1 mGy)

Table 2. Specifications of neutron survey meter

Victoreen 190N	
Rate	0 μ Sv/h to 0.75 Sv/h 0 cps to 41,660 cps
Integrate	0 μ Sv to 10 Sv 0 to 109 counts
Gamma sensitivity	No response in ^{137}Cs gamma radiation up to 500 R/hr
Accuracy	10% of theoretical (ICRP dose rate)
Temperature range	Operating range is -10 ° C to 40 ° C

2. 실험방법

2.1 조사야 크기 및 위치에 따른 광자와 광중성자 측정

광자와 광중성자의 상호관계를 알아보기 위해 치료 실내 6개 지점을 설정하여 측정하였다. Fig. 2와 같이 선원을 기준으로 하방으로 100 cm 지점인 isocenter를 기준으로 하여, 전방으로 100 cm 떨어진 지점을 'A' point, 좌측으로 100 cm 떨어진 지점을 'B' point 그리고 우측으로 100 cm 떨어진 지점을 'C' point로 지정하였다. 마찬가지로 동일한 방향의 200 cm 떨어진 지점을 각각 'D', 'E', 'F' point로 설정하였다.

설정된 각 지점에 유리선량계와 BF₃ 비례계수관을 개별적으로 위치시켜 선량을 측정하였으며, 측정 시 조사야 크기에 따른 차이를 보기위해 0.5 x 0.5 cm², 10 x 10 cm², 20 x 20 cm², 30 x 30 cm², 40 x 40 cm²로 조사야 크기를 변화시키며 측정하였다. 조사조건은 15 MV의 에너지를 이용하여 1000 MU를 조사하였으며, 400

MU/min의 선량률(Dose rate)을 동일하게 적용하였다. 모든 측정은 변동계수가 0.05 이하가 되도록 10회 측정하여 신뢰도를 확보하였으며, 측정된 값은 평균(Mean)과 표준편차(Standard deviation, SD)를 구하여 비교 분석하였다.

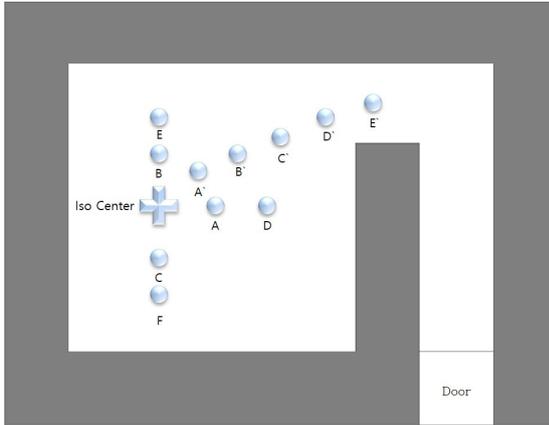


Fig.2. Measurement point in the treatment room.

2.2 거리와 조사야 크기에 따른 광중성자 측정

광중성자의 거리에 따른 선량을 측정하기 위해 치료실내에 거리가 가장 길게 나올 수 있는 대각선 방향으

로 측정 위치를 설정하였다. 측정 위치의 설정은 isocenter를 기준으로 Fig. 2와 같이 100 cm 간격으로 'A', 'B', 'C', 'D', 'E' point로 5개 지점을 설정하였다. 설정된 위치에 BF3 비례계수관을 위치시켜 각 10회씩 측정하여 변동계수가 0.05로 유지되도록 하였으며, 측정된 값을 평균화 하여 거리에 따른 차이를 분석하였다.

III. RESULT

1. 조사야 크기 및 위치에 따른 광자와 광중성자 선량

유리선량계를 이용하여 광자선량을 측정한 결과를 아래 Table 3에 나타내었다. 선량은 'B' point의 40 x 40 cm² 조사야에서 8259±108.5 μSv로 가장 높게 나왔으며, 'D' point의 0.5 x 0.5 cm² 조사야에서 345.3±14.67 μSv로 가장 낮게 나타났다. 전체 측정값에 있어 거리가 멀어질수록 광자의 선량은 감소하는 경향을 보였으며, 조사야의 크기와 비례하여 증가하는 결과를 나타내었다.

Table 3. Photon dose according to the field size and established point [Unit : μSv]

	0.5 × 0.5 cm ²	10 × 10 cm ²	20 × 20 cm ²	30 × 30 cm ²	40 × 40 cm ²
A	797.8±43.35	1177±35.12	2390±46.44	4084±133.6	7844±76.87
B	910.3±81.10	1388±33.65	2559±47.60	4854±128.3	8259±108.5
C	913.2±63.93	1572±63.59	2963±71.57	5010±148.5	7456±168.9
D	345.3±14.67	384.8±5.755	451.2±8.615	556.3±9.961	904.3±15.97
E	424.8±26.11	577.3±5.184	969.3±18.97	1580±83.55	1947±60.17
F	504.3±24.10	667.3±23.43	1042±17.02	1627±59.22	2034±55.01

Table 4. Photoneutron dose according to the field size and established point [Unit : μSv]

	0.5 × 0.5 cm ²	10 × 10 cm ²	20 × 20 cm ²	30 × 30 cm ²	40 × 40 cm ²
A	0.822±0.007	0.791±0.004	0.776±0.003	0.768±0.002	0.767±0.002
B	0.866±0.002	0.851±0.003	0.831±0.005	0.811±0.004	0.768±0.006
C	0.807±0.002	0.803±0.004	0.783±0.007	0.760±0.005	0.738±0.009
D	1.322±0.002	1.292±0.006	1.245±0.002	1.209±0.012	0.973±0.003
E	1.304±0.004	1.210±0.118	1.190±0.008	1.133±0.006	1.115±0.007
F	1.212±0.005	1.130±0.003	1.101±0.004	1.087±0.010	1.078±0.003

Table 5. Photoneutron dose according to the field size and distance [Unit : μSv]

	0.5 × 0.5 cm ²	10 × 10 cm ²	20 × 20 cm ²	30 × 30 cm ²	40 × 40 cm ²
A`	35.4	35.3	34.8	33.7	32.8
B`	54	50.6	47.3	46.3	45
C`	62.5	65.3	61.4	55.2	52.8
D`	62	62.3	66.2	60.9	53.1
E`	50.5	49.3	47.4	50.8	47.6

BF₃ 비례계수관을 이용하여 측정된 광중성자의 결과는 'D' point의 0.5 x 0.5 cm² 조사야에서 1.322±0.002 μSv 로 가장 큰 값을 보였으며, 'A' point의 40 x 40 cm² 조사야는 0.767±0.002 μSv 로 가장 낮은 값을 나타내며 광자선량과는 다른 경향성을 보였다(Table 4). 광중성자의 전체 측정 결과는 거리가 멀어질수록 선량이 증가하는 경향을 보였으며, 조사야의 크기와 반비례하는 결과를 나타내었다.

2. 거리와 조사야 크기에 따른 광중성자 선량

Table 5는 BF₃ 비례계수관 검출기를 이용하여 거리와 조사야 크기에 따른 광중성자 선량을 측정된 결과이다. 조사야 0.5 x 0.5 cm²의 3 m 거리에서 62.5 μSv 로 가장 큰 값을 나타내었으며, 10 x 10 cm²의 조사야에서도 3 m의 거리에서 65.3 μSv 를 나타내며 가장 큰 값을 보였다. 다음으로 조사야 20 x 20, 30 x 30, 40 x 40 cm²에서는 4 m 거리에서 가장 높은 값을 보였으며, 각각 66.2, 60.9, 53.1 μSv 로 측정되었다(Table 5). 모든 측정 결과에 있어서 거리의 이격에 따른 선량값의 증가를 보이다 일정 거리에서 감소되는 경향을 보였다(Fig. 3).

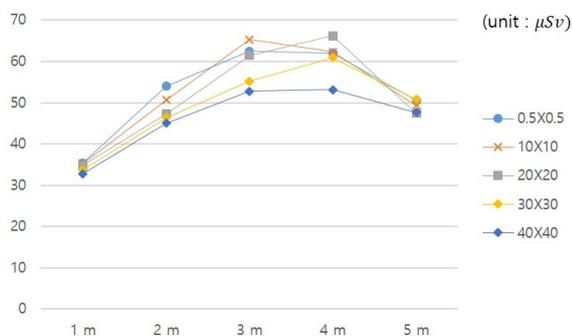


Fig. 3. Photoneutron dose trend of the field size and distance.

IV. DISCUSSION

본 연구에서는 조사야 크기 및 거리 그리고 방향에 따른 광자와 광중성자의 선량을 측정하여 비교 평가하였다.

광자에 대한 선량 측정 결과는 추 등의 선행연구와 같은 경향성을 보이며 거리에 반비례하고, 조사야 크기와는 비례하는 결과를 보였다.^[13] 이러한 경향성은 치료기 갠트리 헤드부의 jaw와의 상호작용에 따른 감소에 의한 것으로 사료되며, 최 등의 선행연구에서도 primary collimator 및 공기와의 상호작용에 의한 감쇠가 일어난다고 보고하였다.^[14,15]

광중성자의 선량 측정 결과는 광자의 결과와 상반되는 경향성을 나타내었다. 조사야의 크기와는 반비례하는 경향성을 보이며 크기가 작을수록 값이 증가하는 결과를 보였다. 일반적으로 방사선 치료 시 조사야 크기가 작아질수록 동일한 선량을 조사할 때 더 높은 MU가 요구되어진다.^[16] 하지만 동일한 MU를 조사하였음에도 조사야가 작을수록 광중성자 선량이 높게 나타나는 이유는 조사야가 좁혀지면서 광자와 jaw와의 광핵반응이 증가한 것으로 판단된다.

선원중심점을 기준으로 측정 위치에 따른 광중성자 선량은 거리가 멀어질수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과는 MCNPX 프로그램을 이용하여 실험한 박 등과 N. Mohammadi 등의 선행연구에서, 광중성자 선량이 거리에 따라 감소하였다는 결과와는 다른 경향성을 보인 것이다.^[17,18] 이것은 모의 실험을 실시한 선행 연구의 경우, 선행가속기와 방사선 치료실의 모델링에서 내부 구조와 구성물성의 차이가 있을 수 있으며 선원과 차폐벽과의 거리 그리고 BF₃ 비례계수관 검출기의 특성으로 인한 영향으로 사료된다. 따라서 추후에

는 모든 기하학적인 조건이 동일한 치료실 환경을 토대로 모의실험과 계측기를 이용한 실측실험이 병용되어야 할 것이다.

거리에 따른 광중성자 선량을 측정된 결과는 모든 조사야에 있어 일정 거리에서 최대 선량을 기록 후, 감소하는 경향성을 보였다. 이것은 A. Ghasemi 등의 선행연구와 같은 경향성을 보였으나 최대 선량 지점의 위치에서는 차이를 보였다.^[19] 이런 경향성은 실험 대상 치료실의 크기 차이 및 주변 차폐벽과의 거리 차이에 의한 것으로 사료되며, 본 연구의 E` point에서 측정값이 불균일하게 계측된 이유도 측정지점과 차폐벽과의 거리가 인접함으로써 발생한 영향으로 평가된다.

광중성자는 광자에 비해 가중치가 높아 소량이라도 간과할 수가 없으며, 치료기 헤드 및 차폐벽 등의 주변 물질에 방사화를 일으켜 2차 피폭을 야기할 수 있다. 그러나 방사선 치료가 정밀해 질수록 광자의 산란선은 감소하지만, 광중성자는 증가하는 것을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다. 그러므로 광중성자의 정확한 측정 및 평가가 시행되어야함에도 불구하고 광중성자의 측정 시 주변 환경에 의한 차이가 발생하게 된다. 또한 방사선 치료실의 환경은 매우 다양하고 개별적이므로 객관적인 자료를 제시하기가 어렵다. 따라서 광중성자를 계측함에 있어서 모의모사 프로그램의 정확한 모델링을 이용한 평가와 함께 실측을 통한 상호보완적인 측정 및 분석이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 더불어 광중성자에 의해 발생하는 방사화에 대한 관리 또한 장기간에 걸쳐 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

V. CONCLUSION

본 연구는 방사선 치료실 내 광자와 광중성자의 선량특성에 대한 경향성을 분석하기 위해 실험을 수행하였다. 정밀한 방사선치료 시 좁은 조사야를 이용함에 따라 광자의 산란선은 감소하지만 광중성자는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 광중성자는 선원중심을 기준으로 일정거리 안에서는 오히려 증가함을 알 수 있었다. 따라서 정상조직의 피폭 및 방사선 방어의 관점에서 정밀한 광중성자의 측정을 실시하여, 선량정보를 빅 데이터화함으로써 피폭선량 저감화에 대한 적극적인 노력이 필요할 것이다.

Reference

- [1] J. S. Lee, J. N. Kim, "Efficient Data Acquisition Technique for Clinical Application of Multileaf Collimator," The Journal of the Korea Contents Association, Vol. 8, No. 11, pp. 182-188, 2008.
- [2] E. T. Park, D. H. Lee, S. S. Kang, "Evaluation of Photoneutron by Hypofractionated Radiotherapy," The Journal of the Korea Contents Association, Vol. 15, No. 12, pp. 347-354, 2015
- [3] E. T. Park, D. Y. Lee, S. J. Ko, J. H. Kim, S. S. Kang, "A Study on Photon Spectrum in Medical Linear Accelerator Based on MCNPX," Journal of the Korean Society Radiology, Vol. 8, No. 5, pp. 249-254, 2014
- [4] O. N. Yang, C. H. Lim, "Study on the Photoneutrons Produced in 15 MV Medical Linear Accelerators : Comparison of Three-Dimensional Conformal Radiotherapy and Intensity-Modulated Radiotherapy," Journal of Radiological Science and Technology, Vol. 35, No. 4, pp. 335-343, 2012
- [5] J. O. Lee, D. H. Jeong, J. K. Kang, "Neutron Generation from a 24 MV Medical Linac," Korean Journal of Medical Physics, Vol. 16, No. 2, pp. 97-103, 2005
- [6] E. T. Park, S. J. Jin, C. W. Park, "Evaluation of Photoneutron During Radiation Therapy when Using Flattening Filter and Tracking Jaw with High Energy X-ray," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 10, pp. 125-131, 2016
- [7] L. donadille, F. Trompier, I. robbes, S. Derreumaux, J. Mantione, B. Asselineau, K. Amgarou, A. Martin, J. F. Bottollier-Depois, F. Queinnec, B. Aubert, I. Clairand, "Radiation protection of workers associated with secondary neutrons produced by medical linear accelerators," Radiation Measurements, Vol.43, No. 2-6, pp.939-943, 2008.
- [8] Y. S. Park, H. T. KIM, S. J. Ko, S. S. Lee, Radiobiology 2nd edition, Jeongmungak, Seoul, 2012.
- [9] ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, 2007.
- [10] AAPM, Neutron Measurements Around High Energy X-ray Radiotherapy Machines, AAPM Report No.19,

1987

- [11] NCRP, Neutron Contamination from Medical Electron Accelerators, NCRP Report No.79, 1984
- [12] Nuclear Safety and Security Commission, Nuclear Safety Act, 2014
- [13] S. S. Chu, C. O. Suh, G. E. Kim, "Shielding for Critical Organs and Radiation Exposure Dose Distributions in Patients with High Energy Radiotherapy," Journal of Radiation Protection and Research, Vol. 27, No. 1, pp. 1-10, 2002
- [14] S. K. Choi, "Change of the Scattered Dose by Field Size in X-ray Radiation," The Journal of the Korea Contents Association, Vol. 13, No. 3, pp. 198-203, 2013
- [15] S. K. Choi, "Relationship between the Distribution of Space doses in X-ray Rooms and the "Inverse Square Law of Distance"," The Journal of the Korea Contents Association, Vol. 13, No. 8, pp. 301-307, 2013
- [16] S. S. Kang, I. H. Go, G. J. Kim, S. H. Kim, Y. S. Kim, Radiation Therapeutics 3rd edition, Cheong-gu munhwasa, Seoul, 2014.
- [17] N. Mohammadi, S. H. Miri-Hakimabad, L. Rafat-Motavalli, "A Monte Carlo Study for Photoneutron Dose Estimations around the High-Energy Linacs," Journal of Biomedical Physics & Engineering, Vol. 4, No. 4, pp. 127-140, 2014
- [18] E. T. Park, S. J. Ko, J. H. Kim, S. S. Kang, "Evaluation of Photoneutron Energy Distribution in the Radiotherapy Room," Journal of Radiological Science and Technology, Vol. 37, No. 3, pp. 223-231, 2014
- [19] A Ghasemi, T. Allahverdi Pourfallah, M. R. Akbari, H. Babapour, M. Shahidi, "Photo neutron dose equivalent rate in 15 MV X-ray beam from a Siemens Primus Linac," Journal of Medical Physics, Vol. 40, No. 2, pp. 90-94, 2016

고에너지 X-선 사용에 따른 방사선치료실 내 광자와 광증성자 평가

박은태

인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

요 약

근래의 방사선 치료는 고 에너지 사용이 증가하여 심부에 위치한 종양의 치료효율이 높아졌다. 그러나 이와 함께 광핵반응으로 인한 광증성자의 발생이 문제되고 있으며, 광증성자는 광자보다 인체의 위해도가 높아 지속적인 관리가 요구된다. 이와 관련하여 몬테카를로 방식의 모의실험을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 실측에 있어서는 미비한 실정이다. 이에 본 연구는 방사선 검출기를 이용하여 거리와 위치에 따른 광자와 광증성자를 측정하여 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 광자는 거리가 멀어지고 조사야가 작아질수록 산란선량이 감소함을 알 수 있었다. 또한 광증성자는 광자와는 다르게 조사야가 작을수록 선량값이 증가하였으며, 일정거리까지 증가하는 경향성을 보이다 감소하는 것으로 나타났다.

중심단어: 광핵반응, 광증성자, 광자